先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022072802

蓝宝石光纤高温 Fabry-Perot 传感器综述

张雨彤[1,2]，江　毅[1*]，冯新星[1]，崔　洋[1]

（1. 北京理工大学 光电学院 信息光子技术工业和信息化部重点实验室，北京 100081；
2. 包头师范学院 物理科学与技术学院，内蒙古 包头 014030）

摘　要： 蓝宝石为晶体材料，其熔点为 2 045 ℃，具有高强度、高耐热性、高抗腐蚀性等良好的高温物理化学性能。单晶蓝宝石光纤可以在高于 1 000 ℃的超高温下传输光信号，基于其制作的蓝宝石光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot，F-P)传感器耐超高温、本征安全，适用于危险、恶劣的环境中，近年来，得到广泛研究，已研制出用于超高温环境的蓝宝石光纤温度、压力、振动传感器。文章综述了蓝宝石光纤 F-P 传感器的研究进展，介绍了课题组在蓝宝石光纤传感技术方面的研究成果，最后对传感器的研制提出了改进建议。

关键词： 蓝宝石光纤；光纤传感器；法布里-珀罗腔；超高温

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0704－10

Review of Sapphire Fiber High Temperature Fabry-Perot Sensor

ZHANG Yutong[1,2], JIANG Yi[1], FENG Xinxing[1], CUI Yang[1]

（1. Key Lab. of Photonic Information Technol., Ministry of Industry and Information Technol., School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technol., Beijing 100081, CHN;
2. School of Physical Science and Technol., Baotou Teachers' College, Baotou 014030, CHN）

Abstract: Sapphire is a crystal material with a melting point of 2 045 ℃. It has excellent high-temperature physical and chemical properties such as high strength, high heat resistance, and high corrosion resistance. The single crystal sapphire fiber can transmit optical signals in the ultra-high temperature environment over 1 000 ℃. Optical fiber Fabry-Perot(F-P) sensors based on sapphire fiber is resistant to ultra-high temperature and intrinsically safe, and can be used in dangerous and harsh environments. In recent years, many scholars have carried out related research and developed sapphire fiber sensors for the measurement of temperature, pressure and vibration in ultra-high temperature environments. In this paper, the research progress of sapphire fiber F-P sensor was reviewed, and the work done by the optical fiber sensing and measurement technology research team of the school of optics and photonics of Beijing institute of technology on sapphire fiber sensing technology was introduced. Finally, the author analyzeed and summarized the research of sapphire fiber F-P sensor and give an outlook on its development trend.

Key words: sapphire fiber; optical fiber sensor; Fabry-Perot cavity; ultra-high temperature

收稿日期：2022－07－28.
基金项目：国家自然科学基金企业联合创新重点基金项目(U20B2057)；航天科技集团应用创新计划项目(6230114003)；包头师范学院高水平研究成果培育项目(BSYKJ2022-ZY07).

* **通信作者：**江　毅　**E-mail:** bitjy@bit.edu.cn

0　引言

近年来，航空航天、能源开采、石油勘探等领域的快速发展，对超高温环境下物理量的测量提出了更高的要求[1-4]。电学传感器受限于传感器材料、电信号输出线等因素，无法应用于高温、易燃易爆等危险环境中[5-7]。光纤传感器具有耐高温、抗电磁干扰、本征安全等优点，已应用于恶劣环境下的参数测量[8-10]。当温度超过 700 ℃后，普通石英光纤中的锗或稀土离子掺杂产生热扩散，降低光纤传输性能，使其无法长期在超高温环境中工作。

蓝宝石（Al_2O_3）是一种晶体材料，其熔点为 2 045 ℃，最高工作温度达 1 800 ℃，光学透射窗口为 0.5～3.5 μm，单晶蓝宝石光纤具有光波导特性并且耐超高温[11]。光纤法布里-珀罗（Fabry-Perot，F-P）传感器结构简单、制作成本低、测量分辨率高、设计灵活多变，并且该结构天然适合压力、温度等参数的测量[12]，是用于 1 000 ℃以上超高温环境中的传感器的最佳技术方案。

本文综述了蓝宝石光纤 F-P 传感器的研究进展，介绍了课题组研制的蓝宝石光纤 F-P 温度、压力、振动传感器及多模光纤高阶模式抑制技术，最后从传感器的制作工艺、信号解调等方面提出了改进建议。

1　蓝宝石光纤 F-P 传感器研究进展

美国弗吉尼亚理工大学最早开始研究蓝宝石光纤 F-P 传感器，其研制的传感器已被应用于发动机温度、油井温度、飞行器表面应变的测量。我国众多研究机构也相继开展了蓝宝石光纤 F-P 传感器的研究，经过近 10 年的发展，技术逐渐成熟，已开发出大量具有工程应用价值的适合超高温环境下的传感器。

1.1　蓝宝石光纤 F-P 温度传感器

1992 年，弗吉尼亚理工大学的 Wang 等[13]首次提出了蓝宝石光纤 F-P 温度传感器，其结构如图 1 所示。将一段芯径为 125 μm、长为 32 mm 的蓝宝石光纤与单模光纤熔接，熔接处因两种材料折射率不同而形成反射面，后端蓝宝石光纤端面为另一反射面，构成蓝宝石 F-P 腔。该传感器在 310～976 ℃内，温度分辨率达 0.2 ℃。2003 年，Xiao 等[14]将两段蓝宝石光纤端面进行精细研磨抛光后，在陶瓷基座上对准，用高温胶固定，蓝宝石光纤端面间构成空气间隙 F-P 腔，如图 2 所示，传感器用于高温应变测量，同时实现了室温至 1 000 ℃的温度测量。该传感器用外径为 140 μm、芯径为 100 μm 的多模光纤与芯径为 100 μm 的蓝宝石光纤熔接传输光信号，多模光纤相较单模光纤与蓝宝石光纤芯径更接近，降低了熔接损耗，提升了干涉信号的信噪比。在上述两项工作的基础上，Wang 等[15]提出了一种多点测量的蓝宝石光纤 F-P 温度传感器。将几段端面平整的蓝宝石光纤插入陶瓷套管中，构成 3 个 F-P 腔，其腔长分别为 47，95 和 145 μm，3 个 F-P 腔形成串联结构。对传感器进行了室温至 1 200 ℃的温度测试，结果显示在 1 000 ℃时传感器的灵敏度达 20 nm/℃，分辨率为 0.3 ℃。

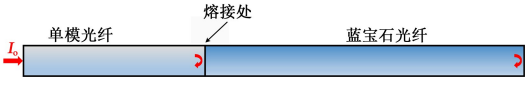


图 1　蓝宝石光纤温度传感器基本构型示意图

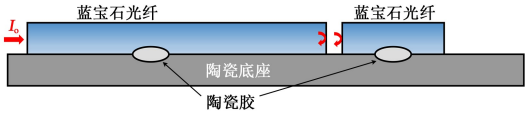
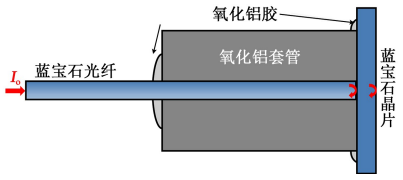
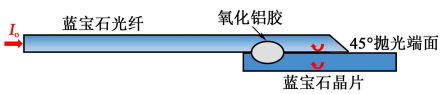


图 2　空气间隙 F-P 应变、温度传感器结构示意图

利用蓝宝石光纤作为导光光纤、蓝宝石晶片两个表面作为反射面，构成蓝宝石晶片腔温度传感器是另一种典型结构。Zhu 等[16]首次提出了一种蓝宝石晶片腔 F-P 温度传感器，其结构如图 3(a)所示，将一段芯径为 75 μm、长为 15 cm 的蓝宝石光纤插入陶瓷套管，光纤端面紧贴蓝宝石晶片，厚度为 59 μm 的晶片的两个表面作为反射面而构成 F-P 腔，利用晶片的热膨胀效应和热光效应来测量温度，测温范围为 230～1 600 ℃，精度为满量程的 ±0.2%。Zhu 等[17]还提出了一种全蓝宝石结构的晶片腔温度传感器，其结构如图 3(b)所示，将一段蓝宝石光纤端面抛光成 45°，蓝宝石光纤与蓝宝石晶片紧密粘结，光束在 45°端面反射垂直入射至晶



(a)　典型结构



(b)　45°端面抛光的蓝宝石晶片腔温度传感器结构

图 3　蓝宝石晶片腔温度传感器

片而形成干涉，传感器分辨率达 0.4 ℃，24 ℃时的灵敏度为 1.524 nm/℃，1 170 ℃时的灵敏度达 2.322 nm/℃。该传感器体积小，并且采用全蓝宝石材料，可以在超高温环境下长时间工作。

近年来，我国的一些研究机构也开展了蓝宝石晶片腔温度传感技术研究。2019 年，刘铁根等[18]提出了一种自滤波式双蓝宝石光纤温度传感器，其结构和光路示意图如图 4 所示。该传感器采用两根抛光的蓝宝石光纤，分别用于输入光信号和接收光信号，从而将背景光和干涉信号进行分离，使得干涉信号的条纹对比度和信噪比显著提高，温度分辨率优于 0.25 ℃。2020 年，丁铭等[19]提出了一种结构更稳定的蓝宝石光纤温度传感器，用两个空心陶瓷管将蓝宝石晶片固定于陶瓷套筒中间，两端用高温胶固定，对传感器进行了 25～1 550 ℃的宽温度范围测试实验，结果显示在 1 550 ℃时温度灵敏度达到 32.5 pm/℃。

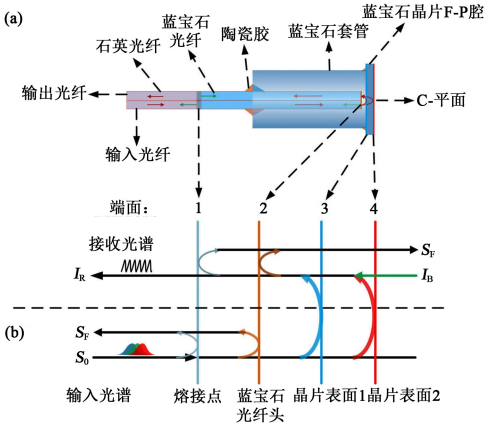


图 4 自滤波式双蓝宝石光纤温度传感器。(a)传感器结构示意图；(b)传感光路示意图

Wang 等[20-21]提出了一种新型蓝宝石光纤温度传感器结构，该传感器采用电子束蒸发的方式将金属薄膜镀在蓝宝石光纤的端面上，从而构成 F-P 腔。传感器体积小，但受金属的耐温性能、金属薄膜与蓝宝石光纤结合程度等因素限制，两只传感器的测温范围仅为 200～1 000 ℃。

1.2 蓝宝石腔 F-P 压力传感器

Sugiyama 等[22]提出了一种蓝宝石晶体直接键合的方法，首先采用强酸强碱溶液清洗蓝宝石晶片，通过稀硫酸形成亲水层，将两片晶片进行贴合，然后在 200 ℃下加热 30 min，再转入高温炉中，在 1 100 ℃下持续加热 50 h 实现高强度键合。该方法为研制蓝宝石腔 F-P 压力传感器奠定了基础。

Yi 等[23]提出了一种用于压力传感的全蓝宝石 F-P 腔，其结构如图 5 所示。通过感应耦合等离子体刻蚀(ICP)技术在一片蓝宝石晶片上刻蚀出圆柱形浅槽，将带有凹槽的晶片与另一片蓝宝石晶片进行高温键合，中间的空腔即为 F-P 腔。用多模光纤传输光信号，在室温下进行了 0.04～1.38 MPa 的压力测试，结果显示其分辨率达到 ±0.004 MPa。2021 年，Yi 采用蓝宝石光纤代替多模光纤来传输光信号，经测试，在室温至 1 000 ℃的温度范围内，传感器腔长随压力呈线性变化。此外，美国佛罗里达大学、英国 Oxsensis 公司基于热压键合工艺也研制出相关的蓝宝石压力传感器[25-26]。

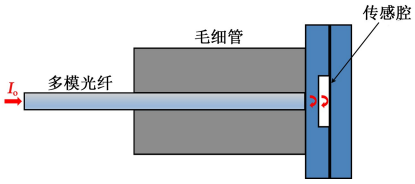


图 5 全蓝宝石 F-P 腔压力传感器结构示意图

我国的一些研究机构通过改进晶片刻蚀、晶片键合等相关工艺，研制了蓝宝石 F-P 腔压力传感器。

李旺旺等[27]提出了一种蓝宝石直接键合技术，首先通过 ICP 对蓝宝石晶片表面进行刻蚀和氧等离子体活化处理，形成亲水性表面，然后将晶片在甲醇溶液中预键合，最后在高温热压炉中进行高温键合。使用的石墨夹具及键合后的蓝宝石传感头如图 6 所示。测试结果表明，键合界面的拉伸强度达到 7.2 MPa。采用上述工艺研制出了蓝宝石密闭 F-P 腔[28]，用多模光纤传输信号，进行了高温压力测试，结果表明，传感器可以在 800 ℃下测量 20～700 kPa 的压力变化。

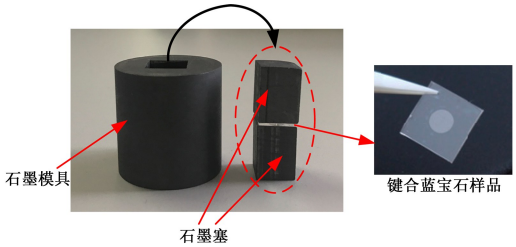


图 6 高温键合用石墨夹具及全蓝宝石传感头

2020 年，庞拂飞课题组[29]提出一种三层结构蓝宝石 F-P 干涉仪，其外部采用氧化锆套筒封装。实验结果表明，传感器能够在 −50～1 200 ℃的温度范围内测量压力，压力量程为 0.4～4.0 MPa，在每个

测试温度下，F-P 干涉仪的特征波长随压力呈线性变化，在 1 200 ℃时，压力灵敏度为 1.20 nm/MPa。

为了提高干涉信号质量，邵志强等[30]于 2021 年，提出了一种针对蓝宝石晶片的湿法刻蚀技术，在 280 ℃下，通过不同比例的磷酸和硫酸溶液对晶片进行刻蚀。当磷酸和硫酸的比例为 1∶3 时，刻蚀的晶片表面粗糙度达到 0.39 nm，通过热压键合得到密闭 F-P 腔，解调出的腔长波动低至±5 nm。利用上述湿法刻蚀技术，在 210 μm 厚的蓝宝石晶片上刻蚀出了 2 mm×2 mm×100 μm 的方形浅槽[31]，将带凹槽的蓝宝石晶片与 280 μm 厚的蓝宝石晶片进行热压键合，由单模光纤传输光信号，传感器在 800 ℃下进行了压力测量实验，结果显示其平均压力灵敏度为 355.8 nm/MPa。为了提高传感器的工作温度，在此基础上，利用蓝宝石光纤传输光信号，使传感器的工作温度提高到 1 200 ℃[32]。

2　作者团队关于蓝宝石光纤高温传感器的研究进展

作者所在研究团队先后开展了大型发电机组光纤振动测量技术和轨道温度监测的分布式光纤温度测量技术，以及光纤声（声纳）传感器的研究。从 2007 年以后逐渐转向光纤 F-P 传感器、光纤白光干涉解调技术、光纤激光干涉解调技术、高温光纤传感器等领域的研究。

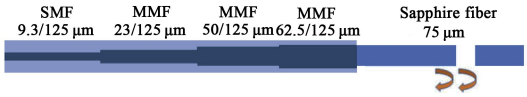
近年来，团队在蓝宝石光纤传感器方面开展了一系列研究。本节首先介绍团队提出的两种用以获得高信噪比的白光干涉条纹的多模抑制技术，然后分别介绍提出的蓝宝石晶片腔温度传感器、全蓝宝石光纤温度传感器、蓝宝石光纤振动传感器和蓝宝石光纤压力传感器。

2.1　多模蓝宝石光纤高阶模式抑制技术

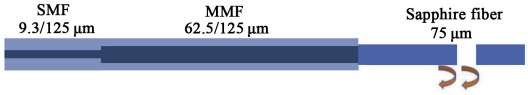
蓝宝石光纤是以光纤本身为纤芯、空气为包层的多模光纤，高阶模式的激发会降低干涉条纹的对比度和信噪比，并且高阶模式与基模之间的不规则耦合会影响基模干涉条纹的相位分布。课题组首次提出并验证了两种多模蓝宝石光纤高阶模式抑制技术，该技术能有效提高蓝宝石光纤干涉仪解调精度。

2.1.1　多级耦合多模蓝宝石光纤高阶模式抑制技术[33]

在多级耦合多模光纤拾取干涉信号的方案中，中间芯径的光纤可以引导基模从单模光纤过渡到蓝宝石光纤，能够抑制高阶模式的激发。同时，多级耦合多模光纤可以降低单模光纤和多模光纤纤芯失配引起的损耗，提高干涉条纹的信噪比。如图 7 所示，采用单级耦合与多级耦合两种方案拾取 F-P 腔干涉信号进行对比实验，其中单级耦合用芯径为 9.3 μm 的单模光纤与芯径为 62.5 μm 的多模光纤直接熔接，而多级耦合用芯径为 9.3 μm 的单模光纤与芯径为 23，50 和 62.5 μm 的多模光纤依次熔接，最后与长度相同、芯径为 75 μm 的蓝宝石光纤进行熔接。



（a）　单级耦合模型



（b）　多级耦合模型

图 7　蓝宝石光纤 F-P 腔干涉信号拾取方案

宽带光源（1 521～1 567 nm）通过 2×2 耦合器注入到 F-P 腔中，两种拾取方案的反射光由光谱仪接收，单级耦合多模光纤和多级耦合多模光纤拾取到的 F-P 腔干涉光谱和相应的频谱图如图 8 所示。单级耦合拾取的干涉光谱中干涉信号只出现在 1 538～1 567 nm 波长范围内，而多级耦合拾取的光谱有明显改善，干涉信号几乎存在于全波长范围内，对比度显著提高，频谱图表明多级耦合拾取的频谱主频信号强度大、信噪比高。保持周围环境稳定，连续记录 100 s 的腔长数据，通过测量腔长的波动幅度，获得传感器解调的重复性精度。结果如图 9 所示，可见相较单级耦合，多级耦合方案解调出的腔长波动小，显示高阶模抑制后解调重复性精度明显提升。

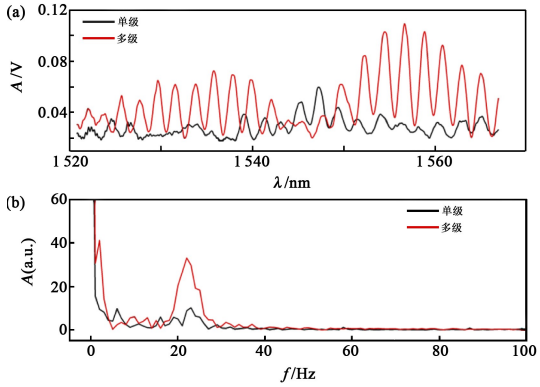


图 8　单级耦合和多级耦合拾取的 F-P 腔干涉信号。（a）光谱；（b）频谱

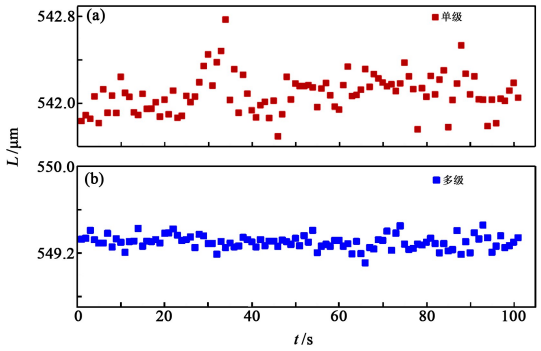


图 9 常温常压下 100 s 测量时间内测得的腔长。(a)单级耦合;(b)多级耦合

2.1.2 锥形多模蓝宝石光纤高阶模式抑制技术[34]

锥形光纤可以将多模光纤中高阶模式转化为低阶模式,并且当基模耦合到锥形光纤中时,基模可以实现低损耗传输,能量基本不会耦合到高阶模式中。图 10(a)为锥形多模光纤拾取 F-P 腔干涉信号结构示意图,通过融拉法将芯径为 62.5 μm 的多模光纤拉制成锥形多模光纤,锥区与单模光纤熔接,另一端熔接芯径为 75 μm 的蓝宝石光纤。图 10(b)为常规多模光纤拾取方案。

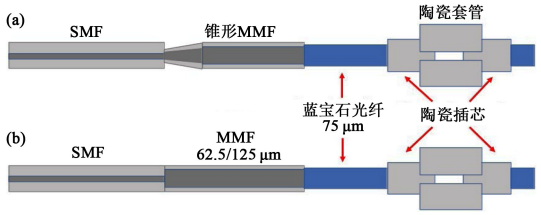
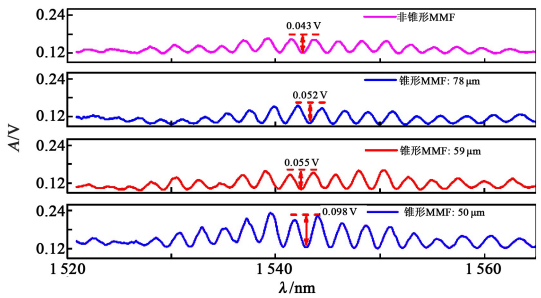
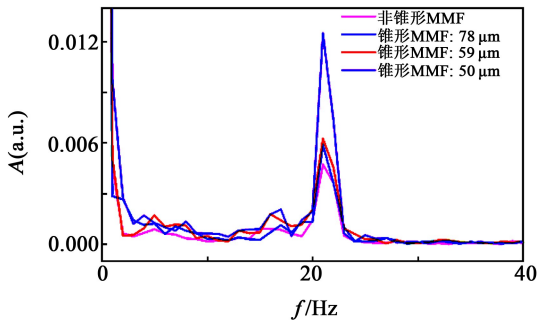


图 10 F-P 腔干涉信号拾取方案。(a)锥形多模光纤模型;(b)常规多模光纤模型

常规多模光纤和不同末端直径锥形多模光纤拾取的干涉光谱及对应的频谱如图 11 所示,随着锥区末端直径的减小,干涉信号的幅度及频谱幅度均显著提升,并且频谱带宽基本保持不变。保持周围环境稳定,连续记录 500 s 的腔长,如图 12 所示,对比显示,锥形多模光纤拾取的信号解调精度明显提升。



(a) 光谱



(b) 频谱

图 11 常规多模光纤和锥形多模光纤拾取的 F-P 腔干涉信号

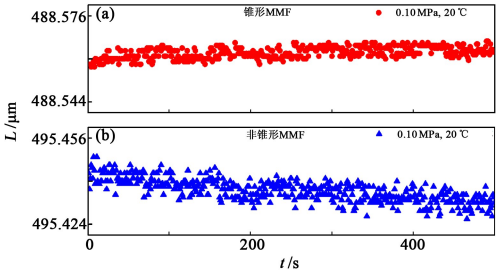
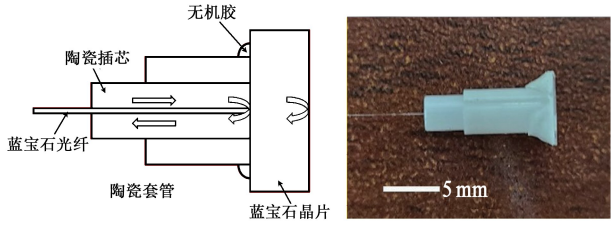


图 12 常温常压下 500 s 测量时间内的腔长变化。(a)锥形多模光纤;(b)常规多模光纤

2.2 蓝宝石晶片腔温度传感器

2.2.1 传感器结构及原理

课题组提出了一种蓝宝石晶片腔 F-P 温度传感器[35],其结构如图 13 所示。将芯径为 75 μm 的蓝宝石导光光纤插入陶瓷插芯中,并将端面研磨平整。通过高温胶将陶瓷套管粘合在蓝宝石晶片上,将带有蓝宝石光纤的陶瓷插芯插入到陶瓷套管中并紧贴蓝宝石晶片。蓝宝石晶片的两个抛光表面间形成 F-P 腔,晶片的热膨胀效应和热光效应将引起光学腔长的改变,通过测量每个温度点下的光学腔长实现温度的测量。



(a) 结构示意图 (b) 实物照片

图 13 蓝宝石晶片腔 F-P 传感器

2.2.2 传感器温度响应测试

为得到蓝宝石晶片的光学腔长,提出了一种基于快速傅里叶变换(FFT)的多模干涉解调算法,解调结果如图 14 所示。采集到的传感器的原始干涉

光谱如图 14(a)所示，截取相长干涉的部分(1 533～1 549 nm)，并去除直流分量，得到的干涉信号如图 14(b)所示，对其进行 FFT 后，通过高斯窗函数将主频滤除，再进行傅里叶逆变换(IFFT)，得到信噪比高、对比度高的多模干涉信号，如图 14(d)所示。对处理后的干涉信号采用干涉级次法解调出晶片的光学腔长，实验中使用了两种厚度的蓝宝石晶片(315 和 437 μm)，两只传感器的温度响应如图 15 所示。

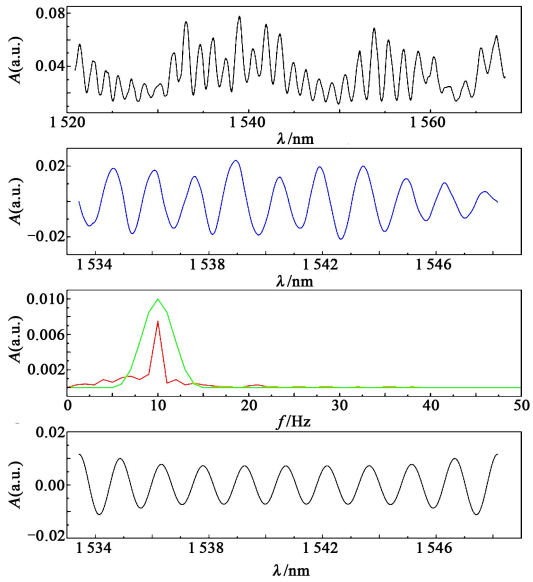


图 14　传感器解调结果。(a)原始光谱；(b)截取并去直流后的干涉信号；(c)FFT 及主频滤波；(d)IFFT

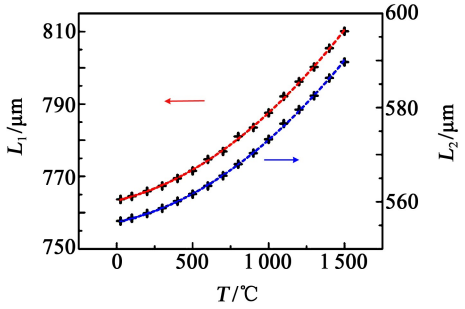


图 15　传感器温度响应曲线

2.2.3　蓝宝石晶片热光系数的测定

蓝宝石的热光系数对研究蓝宝石材料在高温环境下的变化有重要意义。1986 年，Tapping 等[36]将激光束引导至蓝宝石样品上，通过检测反射光束强度的变化，在 633 和 799 nm 波长处测量了蓝宝石晶体在 24～1060 ℃间的热光系数。2001 年，Thomas 等[37-39]提出采用干涉仪测量热光系数的方法，在 10～1 000 K 的温度范围内测量了 1，1.7，2.5 和 4 μm 红外波长的蓝宝石热光系数。2005 年，Zhu 等[17]根据 Tapping 等测得的 633 和 799 nm 波长处的热光系数，通过线性外推法得到 850 nm 波长的蓝宝石热光系数。然而在 1 550 nm 波长处、温度高于 1 100 ℃的蓝宝石热光系数并没有被测量过。

课题组基于传感器的温度响应，总结了中心波长 1 550 nm 处，室温至 1 500 ℃范围内蓝宝石晶片的热光系数，可以为同类型高温温度传感器的测试和标定提供理论支持。

蓝宝石晶片的光学腔长可表示为

$$L(T)=n(T)d(T) \tag{1}$$

其中，$n(T)$和 $d(T)$分别为温度为 T 时的折射率和物理长度。将 $n(T)$和 $d(T)$进行泰勒展开：

$$\begin{aligned} n(T)&=n_0(1+\alpha_n T+\beta_n T^2)\\ d(T)&=d_0(1+\alpha_d T+\beta_d T^2) \end{aligned} \tag{2}$$

其中，n_0 和 d_0 为 0 ℃时的初始折射率和初始腔长，α_n 和 β_n 为一阶和二阶热光系数，α_d 和 β_d 为一阶和二阶热膨胀系数。将式(2)代入式(1)，得到 F-P 腔的归一化温度响应（忽略高阶项）：

$$\hat{L}=\frac{L(T)}{L_0}=1+(\alpha_n+\alpha_d)T+(\beta_n+\beta_d)T^2 \tag{3}$$

其中，$L_0=n_0d_0$。将实验测得的温度响应进行归一化处理，对数据点进行二次拟合，得

$$\hat{L}=1+1.342\,3\times10^{-5}\times T+1.838\,8\times10^{-8}\times T^2 \tag{4}$$

蓝宝石一阶热膨胀系数 $\alpha_d=5.26\times10^{-6}$，二阶热膨胀系数 $\beta_d=7.27\times10^{-9}$[40]，通过式(3)和(4)求得蓝宝石的一阶热光系数 $\alpha_n=8.163\times10^{-6}$，二阶热光系数 $\beta_n=1.107\,5\times10^{-8}$。

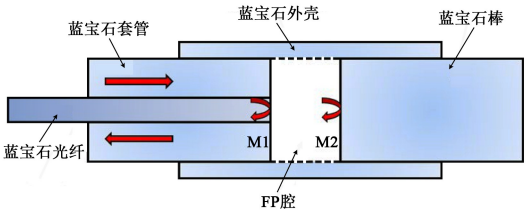
2.3　全蓝宝石光纤温度传感器[41]

课题组提出了一种全蓝宝石光纤温度传感器，测量了传感器室温至 1 500 ℃的温度响应。该传感器采用全蓝宝石封装，避免了在高温环境下因热膨胀系数不匹配而产生的测量误差，同时提升了整体结构的稳定性，使传感器可以长时间工作于 1 000～1 500 ℃的超高温环境中。

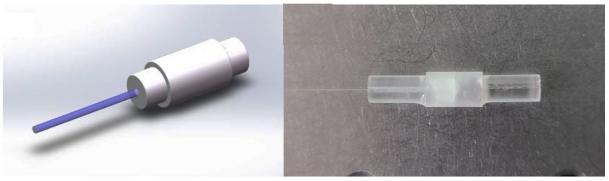
2.3.1　传感器结构及原理

传感器的结构如图 16 所示。将芯径 75 μm 的蓝宝石光纤插入内径为 100 μm 的蓝宝石插芯内，端面磨平后安装到蓝宝石套管中，另一端安装端面平整的实心蓝宝石棒，光纤端面及蓝宝石棒端面形成 F-P 腔。与晶体腔不同，忽略空气热光效应的影响，传感器的温度测量主要影响因素为蓝宝石材料的热膨胀效应，通过测量空气腔的光学腔长标定环

境温度。



(a) 结构图



(b) 3D效果图 (c) 实物图

图16 全蓝宝石光纤高温温度传感器

2.3.2 传感器温度响应测试

传感器解调方法与晶片腔温度传感器相同,从室温至1 500 ℃的温度响应如图17所示,对数据点二次拟合:

$$L(T)=727.1+3.97\times10^{-3}T+5.36\times10^{-6}T^2 \tag{5}$$

温度响应归一化处理后,表示为

$$\hat{L}=1+5.457\,5\times10^{-5}\times T+7.375\,5\times10^{-8}\times T^2 \tag{6}$$

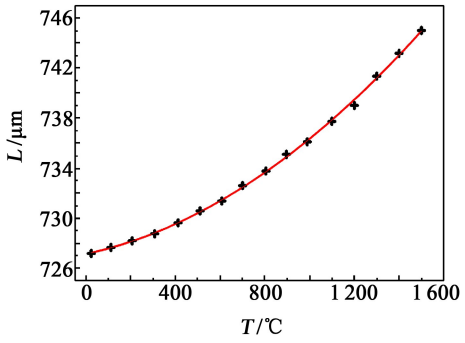


图17 传感器温度响应

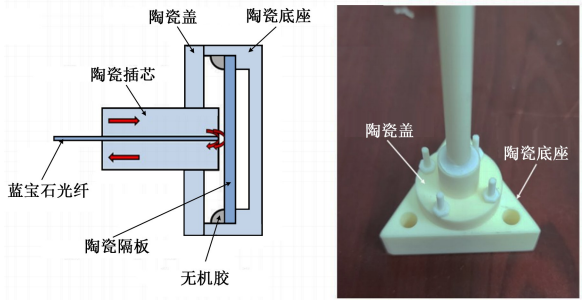
忽略温度对空气折射率的影响,归一化温度响应中的一阶系数和二阶系数即蓝宝石的一阶和二阶热膨胀系数为 $\alpha_d=5.457\,5\times10^{-6}$, $\beta_d=7.375\,5\times10^{-9}$。

2.4 蓝宝石光纤高温振动传感器[42]

课题组提出了一种蓝宝石光纤高温振动传感器,振动膜片和导光光纤均采用蓝宝石材料,使传感器最高工作温度达1 500 ℃,为超高温环境下的振动测量提供技术解决方案。

2.4.1 传感器结构及原理

蓝宝石光纤高温振动传感器采用简支梁结构,如图18所示。振动膜片为300 μm厚的单面抛光蓝宝石晶片,用高温胶固定于陶瓷底座。导光光纤为芯径75 μm的蓝宝石光纤,蓝宝石光纤端面与抛光的晶片表面形成F-P腔,当外界施加平行于光纤轴向的振动信号,振动膜片受迫振动,改变F-P腔腔长,进而造成干涉信号相位的变化。

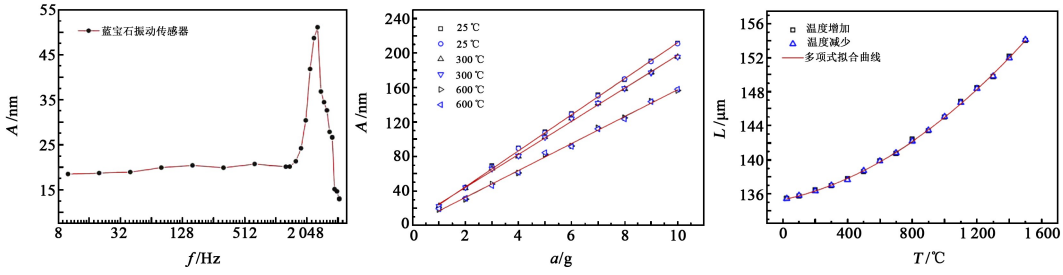


(a) 结构示意图 (b) 实物图

图18 蓝宝石光纤高温振动传感器

2.4.2 传感器响应特性测量

传感器的频率响应如图19(a)所示。在0~2 000 Hz范围内振幅较平坦,可作为测量振动的线性区,主频位置大约在2 700 Hz。对传感器施加640 Hz的正弦振动信号,加速度(a)以1 g为间隔,测试了传感器在0~10 g的加速度响应,如图19(b)所示,三个温度下的加速度响应均呈线性变化。传感器室温至1 500 ℃的温度响应如图19(c)所示,温度上



(a) 频率响应 (b) 加速度响应 (c) 温度响应

图19 传感器测试结果

升和下降时，腔长变化一致，温度降至常温时，F-P 腔腔长回到起始位置，证明了传感器能够在 1 500 ℃的高温环境中工作。

2.5　蓝宝石光纤高温压力传感器[43]

课题组提出了一种蓝宝石光纤高温压力传感器。相较膜片式蓝宝石压力传感器，该传感器采用开腔结构，压力量程宽，制作工艺简单，结构坚固，并且采用全蓝宝石结构，使传感器的工作温度高达 1 400 ℃。

2.5.1　传感器结构及原理

传感器的结构如图 20 所示。将蓝宝石光纤插入内径为 150 μm 的蓝宝石插芯中，安装到蓝宝石套管中，另一端插入端面平整的蓝宝石棒，高温胶涂于管壁两层，留有间隙保持空气流通，蓝宝石光纤端面与蓝宝石棒端面形成 F-P 腔，采用多级耦合多模光纤拾取干涉信号。由于空气折射率随压力线性变化，通过记录 F-P 腔的光学腔长测量环境压力。

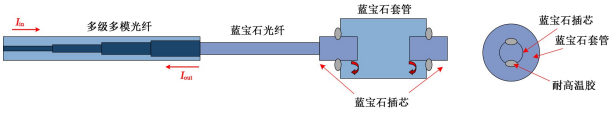
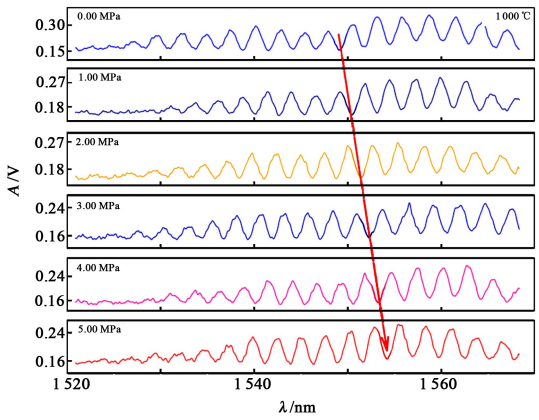


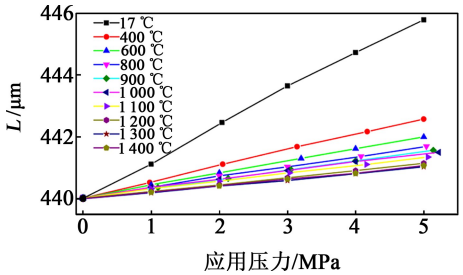
图 20　全蓝宝石光纤压力传感器结构示意图

2.5.2　传感器压力响应测试

传感器压力响应测试结果如图 21 所示。1 000 ℃时，外加压力为 0～5 MPa 时的干涉光谱如图 21(a)所示，随着压力增大，传感器的干涉光谱红移。传感器的压力响应如图 21(b)所示，0～1 400 ℃范围内，传感器光学腔长随压力线性变化，压力灵敏度最大值为 1.167 3 μm/MPa，随着温度的升高而降低。



(a)　1 000 ℃外加压力 0～5 MPa 光谱变化



(b)　光学腔长与压力关系

图 21　传感器压力响应测试结果

3　总结与展望

蓝宝石光纤 F-P 传感器耐高温、耐腐蚀、抗电磁干扰，并且其结构适合温度、压力、振动等物理量的测量，是具有工程应用价值的超高温传感器。为进一步提高蓝宝石光纤 F-P 传感器的工作温度、精度、量程等性能指标，使其满足相关领域的应用需求，需要在传感器制作工艺、信号解调等方面做出努力：(1)研究针对蓝宝石多模光纤中高阶模式的滤波技术和基模干涉提取技术，以有助于蓝宝石光纤传感器的高精度测量；(2)通过飞秒激光微纳加工、微机电系统加工，研制微纳结构的蓝宝石光纤传感器；(3)改进传感器的封装工艺，结合键合工艺、氢氧焰焊接技术等，制备出高稳定性、高耐温性的蓝宝石光纤传感器。

参考文献：

[1]　杨永军，蔡　静，赵　俭. 航空发动机研制高温测量技术探讨[J]. 技术测试，2008，28(B10)：46-48.
Yang Yongjun，Cai Jing，Zhao Jian. Discussion on high temperature measurement technology for aero-engine development[J]. Metrology and Measurement Technology，2008，28(B10)：46-48.

[2]　Yang S，Homa D，Heyl H，et al. Application of sapphire-fiber-Bragg-grating-based multi-point temperature sensor in boilers at a commercial power plant[J]. Sensors，2019，19(14)：3211.

[3]　Ma W，Jiang Y，Gao H. Miniature all-fiber extrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor for high-pressure sensing under high-temperature conditions[J]. Measurement Science and Technology，2019，30(2)：025104.

[4]　蒲金飞，蒲俊吉，吴宇列，等. 基于光纤法布里-珀罗腔的振动测量技术研究[J]. 传感器与微系统，2022，41(4)：40-43.
Pu Jinfei，Pu Junji，Wu Yulie，et al. Research on vibration measurement technology based on optical fiber Fabry-Perot cavity[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2022，41(4)：40-43.

[5]　Cui Z，Li X，Chen G，et al. Thin-film temperature sensor made from particle-filled polymer-derived ceramics pyrolyzed in vacuum[J]. J. of the European Ceramic Society，2022，42(6)：2735-2742.

[6]　Guo S，Eriksen H，Childress K，et al. High temperature smart-cut SOI pressure sensor[J]. Sensors and Actuators A：

Physical, 2009, 154(2): 255-260.

[7] 李育刚, 姚素英, 张生才, 等. 一种新型单晶硅 SOI 高温压力传感器[J]. 传感技术学报, 2002(4): 322-325.
Li Yugang, Yao Suying, Zhang Shengcai, et al. A new type high-temperature SOI monocrystal-silicon pressure sensor[J]. Chinese J. of Sensors and Actuators, 2002(4): 322-325.

[8] 张 硕, 江 毅. 一种光纤高温压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6): 10-12, 70.
Zhang Shuo, Jiang Yi. Optical fiber high-temperature pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(6): 10-12, 70.

[9] 王元生, 温志勋, 艾长胜, 等. 一种新型结构非本征 F-P 传感器全应变测量性能研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 137-143.
Wang Yuansheng, Wen Zhixun, Ai Changsheng, et al. Research on full strain measurement performance of non-intrinsic optical fiber F-P sensor[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 137-143.

[10] 廖常锐, 何 俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 130-138.
Liao Changrui, He Jun, Wang Yiping. Study on high temperature sensors based fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 130-138.

[11] 叶林华, 沈永行. 蓝宝石单晶光纤高温仪的研制[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(6): 437-442.
Ye Linhua, Shen Yongxing. Development of a sapphire fiber thermometer[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 1997, 16(6): 437-442.

[12] Cui Y, Jiang Y, Liu T, et al. A dual-cavity Fabry-Pérot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80582-80587.

[13] Wang A, Gollapudi S, Murphy K A, et al. Sapphire-fiber-based intrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. Opt. Lett., 1992, 17(14): 1021-1023.

[14] Xiao H, Deng J, Pickrell G, et al. Single-crystal sapphire fiber-based strain sensor for high-temperature applications [J]. J. of Lightwave Technol., 2003, 21(10): 2276.

[15] Wang J, Dong B, Lally E, et al. Multiplexed high temperature sensing with sapphire fiber air gap-based extrinsic Fabry-Perot interferometers[J]. Opt. Lett., 2010, 35(5): 619-621.

[16] Zhu Y, Huang Z, Shen F, et al. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements[J]. Opt. Lett., 2005, 30(7): 711-713.

[17] Zhu Y, Wang A. Surface-mount sapphire interferometric temperature sensor[J]. Appl. Opt., 2006, 45(24): 6071-6076.

[18] Yu X, Wang S, Jiang J, et al. Self-filtering high-resolution dual-sapphire-fiber-based high-temperature sensor[J]. J. of Lightwave Technol., 2019, 37(4): 1408-1414.

[19] Wang B, Niu Y, Zheng S, et al. A high temperature sensor based on sapphire fiber Fabry-Perot interferometer[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2019, 32(2): 89-92.

[20] Wang J, Lally E M, Dong B, et al. Fabrication of a miniaturized thin-film temperature sensor on a sapphire fiber tip[J]. IEEE Sensors J., 2011, 11(12): 3406-3408.

[21] Wang J, Lally E M, Wang X, et al. ZrO_2 thin-film-based sapphire fiber temperature sensor[J]. Appl. Opt., 2012, 51(12): 2129-2134.

[22] Sugiyama A, Fukuyama H, Sasuga T, et al. Direct bonding of Ti: sapphire laser crystals[J]. Appl. Opt., 1998, 37(12): 2407-2410.

[23] Yi J, Lally E, Wang A, et al. Demonstration of an all-sapphire Fabry-Pérot cavity for pressure sensing[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 23(1): 9-11.

[24] Yi J. Sapphire Fabry-Pérot pressure sensor at high temperature[J]. IEEE Sensors J., 2020, 21(2): 1596-1602.

[25] Mills D A, Alexander D, Subhash G, et al. Development of a sapphire optical pressure sensor for high-temperature applications[J]. Proc. SPIE, 2014, 9113: 107-121.

[26] Pechstedt R D. Fibre optic pressure and temperature sensor for applications in harsh environments [J]. Proc. SPIE, 2013, 8794: 15-18.

[27] Li W, Liang T, Chen Y, et al. Interface characteristics of sapphire direct bonding for high-temperature applications[J]. Sensors, 2017, 17(9): 2080.

[28] Li W, Liang T, Jia P, et al. Fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor based on sapphire direct bonding for high-temperature applications [J]. Appl. Opt., 2019, 58(7): 1662-1666.

[29] Wang Z, Chen J, Wei H, et al. Sapphire Fabry-Perot interferometer for high-temperature pressure sensing [J]. Appl. Opt., 2020, 59(17): 5189-5196.

[30] Shao Z, Wu Y, Wang S, et al. All-sapphire-based fiber-optic pressure sensor for high-temperature applications based on wet etching[J]. Opt. Express, 2021, 29(3): 4139-4146.

[31] Shao Z, Wu Y, Sun Z, et al. Excellent repeatability, all-sapphire Fabry-Perot optical pressure sensor based on wet etching and direct bonding for harsh environment applications [J]. Opt. Express, 2021, 29(13): 19831-19838.

[32] Shao Z, Wu Y, Wang S, et al. All-sapphire fiber-optic pressure sensors for extreme harsh environments[J]. Opt. Express, 2022, 30(3): 3665-3674.

[33] Feng X, Jiang Y, Xie S, et al. Higher-order mode suppression technique for multimode sapphire fiber external Fabry-Perot interferometers[J]. Opt. Express, 2022, 0(4): 4759-4767.

[34] Feng X, Jiang Y, Xie S, et al. Signal pick-up technique for sapphire fiber external Fabry-Perot interferometer using tapered multimode fibers [J]. J. of Lightwave Technol.,

2022，40(12)：3992-3996.

[35] Cui Y，Jiang Y，Xie S，et al. Measurement of sapphire wafer thermo-optic coefficient using high-temperature optical fiber sensors[J]. IEEE Sensors J.，2021，22(3)：2244-2249.

[36] Tapping J，Reilly M L. Index of refraction of sapphire between 24 and 1 060 ℃ for wavelengths of 633 and 799 nm [J]. J. Opt. Soc. Amer. A，1986，3(5)：610-616.

[37] Yang D，Thomas M E，Tropf W J，et al. Infrared refractive index measurements using a new method[J]. Proc. SPIE，2000，4103：42-52.

[38] Tropf W J，Thomas M E，Harris T J. Properties of crystals and glasses[Z]. Handbook of Optics，1995，2：33.61.

[39] Yang D，Thomas M E，Tropf W J. Infrared refractive index of sapphire as a function of temperature[J]. Proc. SPIE，1999，3705：60-69.

[40] Vodenitcharova T，Zhang L，Zarudi I，et al. The effect of thermal shocks on the stresses in a sapphire wafer[J]. IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing，2006，19(4)：449-454.

[41] Cui Y，Jiang Y，Zhang Y，et al. An all-sapphire fibre temperature sensor for high-temperature measurement[J]. Measurement Science and Technol.，2022，33(10)：105115.

[42] Cui Y，Jiang Y，Zhang Y，et al. Sapphire optical fiber high-temperature vibration sensor[J]. Opt. Express，2022，30(2)：1056-1065.

[43] Feng X，Jiang Y，Gao H，et al. Diaphragm-free gas pressure sensor based on all-sapphire fiber Fabry-Perot interferometers [J]. Appl. Opt.，2022，61(22)：6584-6589.

作者简介：

张雨彤(1989—)，男，博士研究生，讲师，主要从事蓝宝石光纤高温传感器的研制及解调等方面的研究；

江　毅(1967—)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事光纤传感器、白光干涉技术、激光干涉技术等方面的研究。